Journal of Radiation Industry 15(4) : 267~274(2021) https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.4.267

국내 운영 중 발전용원자로의 액체 및 기체 방사성유출물 배출특성 분석

강 지 수[1] · 정 재 학[1,*]

[1]경희대학교 원자력공학과

Analysis on Characteristics of Liquid and Gaseous Radioactive Effluents Released from Korean Nuclear Power Plants in Operation

Ji Su Kang[1] and Jae Hak Cheong[1,*]

[1]*Department of Nuclear Engineering, Kyung Hee University, 1732 Deogyeong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea*

Abstract - In order to expand the understanding of the characteristics of radioactive effluent released from operating NPPs, which have not yet been systematically investigated, a quantitative analysis using Sen's slope was performed on 21 NPPs (18 PWRs and 3 PHWRs) in Korea. The gaseous effluent was divided into five radionuclide groups: fission products, radioiodine, particulates, gaseous tritium, and ^{14}C. The liquid effluent was divided into two radionuclide groups: fission and activation products and liquid tritium. Furthermore, by collecting historical radioactive effluents discharge data, the correlation between operation history/events and the discharge characteristics of radioactive effluents by radionuclide groups was identified, and the difference in discharge according to the types of major radioactive waste management systems was compared. The results of this study are expected to be utilized to analyze the trend of year-by-year and unit-by-unit changes in radioactive discharges and major factors affecting the discharges, and to deduce directions for improving the radioactive effluent control at Korean NPPs. Also, by analyzing the correlation between the discharge of liquid and gaseous radioactive effluents by radionuclide groups according to the operation history and significant event of each plant, it will be possible to prepare a technical basis that can be used for the safety regulation of radioactive effluents.

Key words : Nuclear power plants, Radioactive effluents, Sen's slope, Operational history, Radioactive waste management system

서 론

한국의 한국수력원자력(주)(KHNP; Korea Hydro and Nuclear Power Co., Ltd.) 포함한 국내 원자력관계사업자는 원자력안전법 시행규칙 제127조(보고) 및 별표 5에 따라 방사성유출물 배출 데이터를 매 분기마다 규제전문기관인 한국원자력안전기술원(KINS; Korea Institute of Nuclear Safety)에 보고하고 있으며, 한국원자력안전기술원은 해당 보고자료를 검토한 후 그 결과를 원자력안전위원회(NSSC; Nuclear Safety and Security Commission)에 보고하고 있다(원자력안전위원회 2021). 하지만, 해당 검토보고서는 국내 방사성유출물 배출제한치 만족여부를 확인하는데 주 목

* Corresponding author: Jae Hak Cheong, Tel. +82-31-201-3689, E-mail. jhcheong@khu.ac.kr

적이 있는 것으로 추정된다. 또한, 검토결과의 일부가 원자력안전위원회가 주관하는 원자력안전정보공개센터(NSIC; Nuclear Safety Information Center)의 '방사성유출물' 메뉴 및 한국원자력안전기술원이 운영하는 방사성폐기물 안전관리 통합정보시스템(WACID; WAste Comprehensive Information Database)을 통해서 공개되고 있고, 원자력발전소(원전)별 주요 핵종(군)별 방사능 배출량 위주로 공개되고 있어 방사성유출물의 배출 추이에 대한 체계적인 비교 및 분석의 필요성을 확인할 수 있다. 따라서, 이 연구에서 원전별 핵종(군)별 배출량을 정성적, 정량적으로 분석을 하고, 원전별 운전이력 및 사건에 따른 배출특성과의 상호연계성을 분석함으로써 유출물 관리의 최적화에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

운영 중인 원전의 방사성유출물의 연간 배출현황과 특성에 대한 연구는 일부 수행되었으나 부지별 배출현황 분석으로 원전 호기별 특성이 반영되어 있지 않고, 배출현황을 정성적으로 분석하였다는 한계가 있다(OECD/NEA 2003; Kong *et al*. 2017; NRC 2020). 그리고, 미국의 1990년대 상업용원전의 방사성유출물 배출특성을 통계적 방법을 활용하여 정량적으로 분석하였으나 특정 노형과 특정 핵종에 한정된 것을 확인할 수 있다(Harris 2011). 따라서, 기존 연구들을 통해 운영 중인 원전의 방사성유출물 배출특성에 대해 정성적, 정량적 분석과 원전 호기별, 핵종(군)별 특성 반영의 필요성을 파악하였다.

오스파 협약(OSPAR; Oslo and Paris Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-east Atlantic)에서는 최적 가용기법(BAT; Best Available Techniques) 원칙을 적용하며 원자력시설에 대해 방사성물질을 배출량을 0에 가까운 수준까지 감소시키는 방향으로 노력할 것을 선언하였다(OSPAR 2018). 미국 원자력규제위원회(U.S.NRC; United States Nuclear Regulatory Commission)는 방사성유출물의 환경 배출량은 원전의 방사성폐기물 처리계통의 성능에 영향을 받으며 방사성유출물 처리계통의 높은 제염효율을 위해서 적절한 처리계통 조합이 공정의 효율성을 최적화하고 환경보호를 극대화할 수 있다고 언급하고 있다(NRC 2020). 따라서, 실제 운영 중인 원전의 방사성유출물 환경 배출량과 처리계통의 설치 및 운영 유무에 따른 상관관계 분석이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 운영 중 원전의 과거의 20년간 실제 방사성유출물 배출량 데이터를 정성적, 정량적 방법으로 분석하였다. 또한, 원전 호기별 방사성유출물 배출특성과 원전 운전이력 및 사건과의 상관관계를 분석하였으며, 방사성폐기물 주요 처리계통의 종류에 따른 배출특성을 비교하였다.

재료 및 방법

1. 방사성유출물 환경 배출량 데이터 수집 및 핵종(군) 선정

이 연구에서 평가대상 원전으로는 2021년 1월 기준으로 운영 중인 고리, 한빛, 한울, 월성 부지의 가압경수로형 원전(PWR; Pressurized Water Reactor) 18기와 가압중수로형 원전(PHWR; Pressurized Heavy Water Reactor) 3기에 대해서 총 21기 원전을 선정하였다(신고리 3호기는 2016년, 신고리 4호기 2019년, 신월성 2호기는 2015년도 이후부터 운영되어 배출량 데이터가 충분하지 않아 제외하였다). 방사성유출물 데이터 수집과 핵종(군) 선정의 방법은 과거 운영 중 원전의 방사성유출물 배출제한치 설정방법론 개발과 관련한 논문에서 활용된 바 있다(Kang and Cheong 2021). Table 1은 한국의 평가대상 원전에 대한 기초정보를 정리한 것이다. 원전의 방사성유출물 배출량 데이터는 상업운전 해의 다음 해부터 분석하였다. 2000년에서 2009년까지 '방사선관리연보'의 데이터를 수집하고, 2010년도에서 2019년도

Table 1. Basic information about the Korean operating NPPs subjected to evaluation

No.	Reactor	Type	Commercial operation date	Period of available data
1	Kori Unit 2	PWR	Jul, 1983	2000~2019
2	Kori Unit 3		Sep, 1985	
3	Kori Unit 4		Apr, 1986	
4	Shin Kori Unit 1		Feb, 2011	2012~2019
5	Shin Kori Unit 2		Jul, 2012	2013~2019
6	Hanbit Unit 1		Aug, 1986	2000~2019
7	Hanbit Unit 2		Jun, 1987	
8	Hanbit Unit 3		Mar, 1995	
9	Hanbit Unit 4		Jan, 1996	
10	Hanbit Unit 5		May, 2002	2003~2019
11	Hanbit Unit 6		Dec, 2002	
12	Hanul Unit 1		Sep, 1988	2000~2019
13	Hanul Unit 2		Sep, 1989	
14	Hanul Unit 3		Aug, 1998	
15	Hanul Unit 4		Dec, 1999	
16	Hanul Unit 5		Jul, 2004	2005~2019
17	Hanul Unit 6		Apr, 2005	2006~2019
18	Wolsong Unit 2	PHWR	Jul, 1997	2000~2019
19	Wolsong Unit 3		Jul, 1998	
20	Wolsong Unit 4		Oct, 1999	
21	Shin Wolsong Unit 1	PWR	Jul, 2012	2013~2019

까지 한국수력원자력(주)에서 보고하는 '원자력발전소 주변 환경방사능 조사 및 평가 보고서'의 배출량 데이터를 수집하였다(KHNP 2009; KHNP 2019). 편의상 원전을 각 호기별로 K01부터 K21까지 임의의 기호로 표기하였다.

원전에서 환경으로 배출되는 액체 및 기체 방사성물질은 일반적으로 핵종(군)으로 범주화 되며, 국가 당국이나 국제기구에 의해서 주기적으로 기록 및 보고되고 있다(Kang and Cheong 2020). 이 연구에서 기체 방사성유출물의 핵종(군)은 (1) 핵분열생성물(G), (2) 방사성아이오딘(I), (3) 기체 입자(P), (4) 기체 삼중수소(T), (5) ^{14}C (C) 5개 핵종(군)으로 구분하고, 액체 방사성유출물의 핵종(군)은 (1) 핵분열 및 방사화생성물(F), (2) 액체 삼중수소(H)로 2개의 핵종(군)으로 구분하여, 총 7개 핵종(군)을 선정하였다. 용존기체(Dissolved and entrained gases)는 분석대상 원전 21기 모두에서 15년 이상 배출되지 않았으므로 제외하고, 액체 ^{14}C은 21기 원전 중 3기를 제외한 모든 원전에서 배출량 기록이 없어 제외하였다.

2. Sen's slope estimator

Sen의 기울기(Sen's slope)는 추세 기울기의 정도를 평가하는 비모수적 방법으로, 자료가 누락된 경우에도 분석이 가능하다(Sen 1968). 주로 시계열함수에 대해서 연간 수질의 오염정도, 수위변화, 연간 기온 변화 등의 경향성 정도를 분석하는 데에 활용된다(Jeon *et al*. 2018; Kwak *et al*. 2021; Jin *et al*. 2021). 과거 운영 중 원전의 방사성유출물 배출량의 경향성을 분석한 바 있으나, 모두 Mann-Kendall 경향성 검정의 방법을 활용하여 단순한 증감경향성 파악에 그쳤다는 한계가 있다(Harris 2011; Kang and Cheong 2021). 따라서, 이 연구에서는 증감경향성 파악과 그 경향성의 크기(정도) 분석이 가능한 Sen의 기울기 검정을 활용하여 한국 원전의 연간 방사성유출물 배출량의 경향성을 파악하였다. Sen의 기울기 검정에서 X_t ($t=1,2,\cdots, N$)에 대하여 식 (1)과 같이 Y_i가 정의된다.

$$Y_i = \frac{X_j - X_i}{j - i} \tag{1}$$

여기서 모든 i와 j에 대해서 $i<j\leq n$, $N=n(n-1)/2$이고, n은 자료의 개수이다. Y_i를 크기 순으로 정렬한 후 그 중앙값 Y_{med}를 수식 (2)로 정의할 수 있다.

$$Y_{med} = \begin{cases} Y_{\frac{n+1}{2}} & if\ n\ is\ odd \\ \dfrac{Y_{\frac{n}{2}} + Y_{\frac{n+2}{2}}}{2} & if\ n\ is\ even \end{cases} \tag{2}$$

n이 짝수일 경우 $n=2N$, 홀수일 경우에는 $n=2N+1$이다. 수식 (2)의 값을 Sen의 기울기 검정 추정 값으로 사용한다. 양의 값일 경우 증가경향성, 음의 값일 경우 감소경향성이며 그 크기에 따라서 경향성의 정도를 파악할 수 있다.

결 과

1. 방사성유출물 환경 배출량의 정성적 분석

방사성유출물의 배출량은 원전의 노형, 핵종(군), 운전이력 및 사건에 따라 그 배출특성이 상이하다. 한국에서 운영중인 원전 21기를 대상으로 원전별, 핵종(군)별 배출특성을 정성적으로 분석하였다. Fig. 1은 원전 호기별 연간 방사성유출물의 핵종(군)별 배출량이다.

원전의 기체 방사성유출물 호기별 연간배출량의 평균은 PWR에서 Fig. 1(a)의 핵분열생성물이 1.76×10^{-3}~0.907 TBq·y^{-1}, PHWR에서 1.55~4.93 TBq·y^{-1}이다. Fig. 1(b)의 방사성아이오딘은 PWR, PHWR에서 배출되지 않거나 핵분열생성물 배출량의 10^{-5}배에서10^{-8}배로 매우 낮은 배출량이며, (c)의 기체 입자도 방사성아이오딘과 유사한 수준으로 배출되는 것을 확인하였다. Fig. 1(d)의 기체 삼중수소는 PWR에서 다른 기체 핵종(군)과 비교하여 최대 1,000배 정도 높은 0.66~6.04 TBq·y^{-1}의 범위로 배출된다. PHWR은 33.1~44.4 TBq·y^{-1}으로 PWR에서의 배출량보다 7배에서 50배 정도 높은 배출량을 보인다. Fig. 1(e)의 기체 ^{14}C은 PWR에서 0.04~0.13 TBq·y^{-1}, PHWR에서 0.15~0.25 TBq·y^{-1}의 배출량을 보인다.

액체 방사성유출물 호기별 연간배출량의 평균은 PWR에서 Fig. 1(f)의 핵분열 및 방사화생성물이 배출되지 않거나 평균 최대 2.23×10^{-4} TBq·y^{-1}이 배출되며 PHWR은 5.84×10^{-5}~2.12×10^{-4}로 PWR과 유사한 수준으로 배출된다. Fig. 1(g)의 액체 삼중수소는 PWR은 3.3~14.3 TBq·y^{-1}, PHWR은 3.83~22.2 TBq·y^{-1}의 범위로 배출된다.

통계적 분석을 통해서 원전 호기별 연간 액체 및 기체 방사성유출물의 핵종(군)별 배출특성의 다양성과 원전 특성에 의한 연간 배출량의 차이를 확인함으로써 원전 호기별 배출량 변화의 원인으로 운전이력 및 사건과 배출량과의 관계성 파악의 필요성을 확인하였다.

1.1. 기체 방사성유출물 배출특성

기체 핵분열생성물(G)은 PHWR가 PWR에 비해서 배출량이 평균 약 14배 높은 것을 확인할 수 있다. Fig. 2에서 핵분열생성물은 2001년도에 K01 원전에서 전년도와 대비해 15배 이상으로 3 TBq·y^{-1}의 배출량을 보였다. 동일 원전에서 2001년도에 핵연료집합체에서 핵연료봉의 결함 발생을 확인한 이력이 있으며, 핵연료봉의 손상에 의해 핵분열생성물의 배출량이 증가한 것으로 추론할 수 있다(한국원자력안전기술원 2001a).

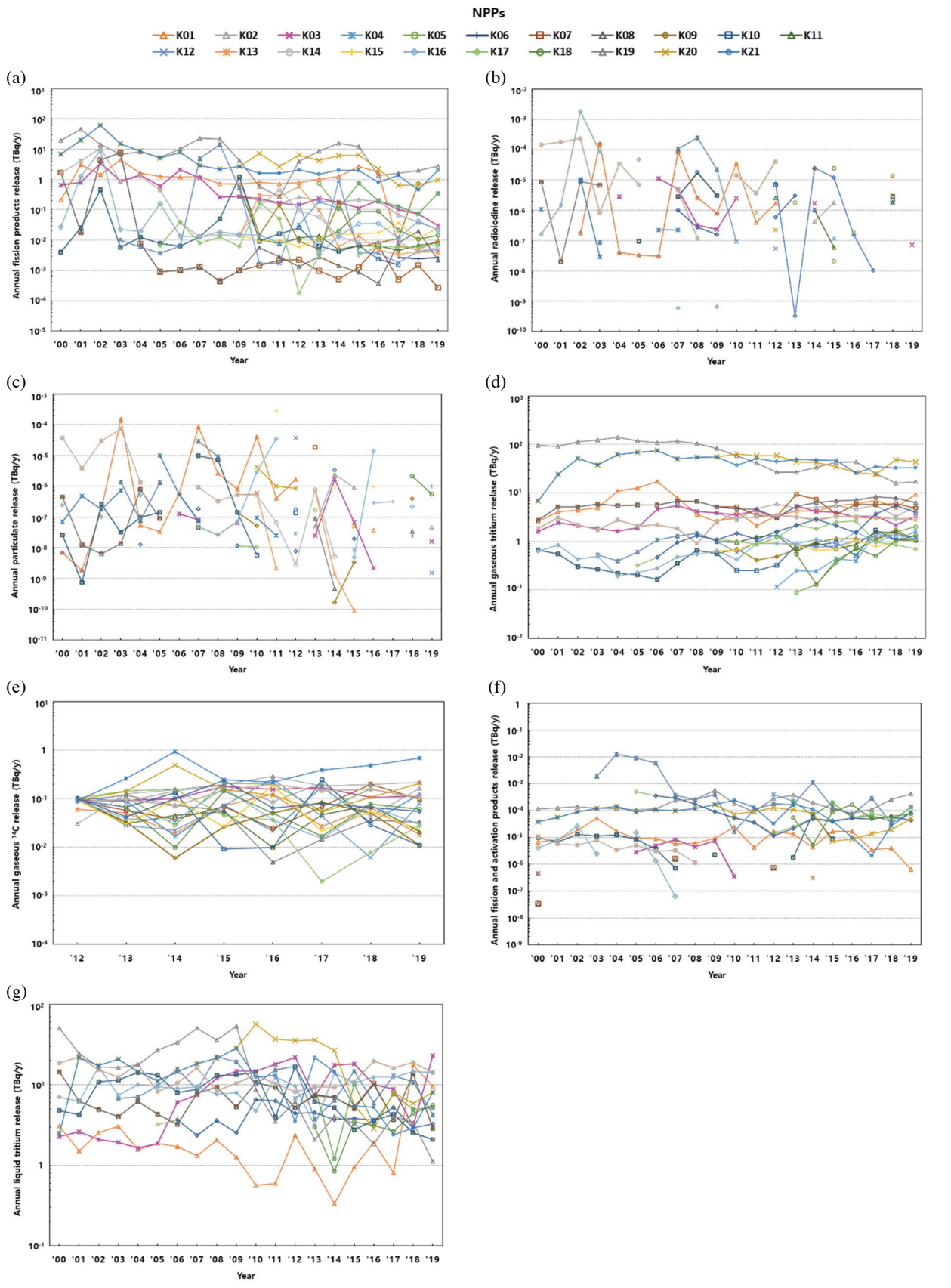

Fig. 1. Annual releases of radioactive effluents by radionuclide groups. (a), (b), (c), (d), (e), (f) and (g) indicate gaseous fission products, radioiodine, particulate, gaseous tritium, gaseous ^{14}C, liquid fission and activation products and liquid tritium, respectively.

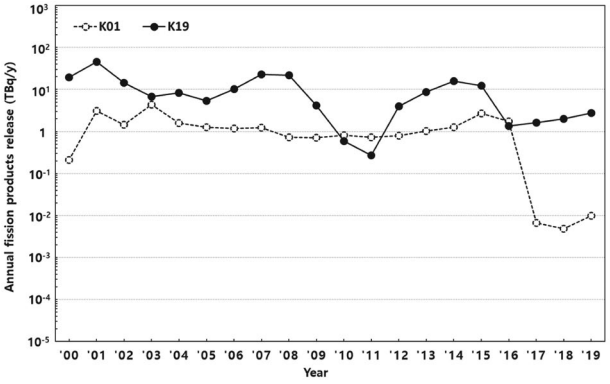

Fig. 2. Annual gaseous fission products release from operating NPPs in Korea.

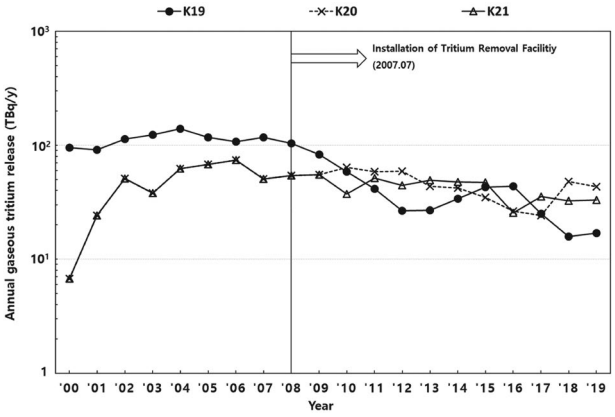

Fig. 3. Annual gaseous tritium release from operating PHWRs in Korea.

Fig. 2에서 2001년도에 K19 원전에서 전년도 대비 3배 이상으로 45 TBq·y^{-1}의 배출량을 확인할 수 있다. 동일 원전에서 전출력으로 정상운전 중이던 원자로건물 내에서 삼중수소 농도가 증가 추세를 보였고, 냉각재 정화계통의 배관과 증기발생기의 저온관을 연결하는 배관 용접부위에서 미세한 균열에 의해 발생된 것으로 확인되면서 계통 퍼지 등으로 인해 핵분열생성물 배출량도 변화되는 것으로 확인할 수 있었다(한국원자력안전기술원 2001b).

방사성아이오딘(I)은 K15 원전에서 2002년 1.75×10^{-3} TBq·y^{-1}로 모든 연도에서 가장 배출량이 높다. 기체 입자(P)의 배출량은 과거 20년 동안 K01, K06-K11, K12, K13 원전에서 감소 경향성을 보인다. 입자는 운영 중 원전의 핵연료 내에서의 핵분열과 연관이 있으며, 가동연도가 증가함에 따라서 핵연료 건전성 개선 효과로 감소경향성을 보이는 것으로 추정할 수 있다(Harris 2011).

기체 삼중수소(T)는 2001년도에 K01 원전에서 그 전년도와 비교하여 약 2배 증가하였다. 동일 원전에서 2006년에 17.2 TBq·y^{-1}로 가장 배출량이 많았으나 특정한 사건에 대한 문서 수집이 불가능하였으며, 향후 운전이력 및 사건에 대한 조사가 필요하다. Fig. 3의 K19 원전은 2002년에 전년도 대비 23.9%의 증가수준을 보인다. 이는 냉각재정화계통 중간 정비를 위해 원자로를 수동정지하는 과정에서 냉각재에 녹아있는 삼중수소가 배출되어 배출량이 증가한 것으로 확인할 수 있다(한국원자력안전기술원 2002). 동일 원전에서 2004년에 전년도 대비 12.9%의 증가수준을 보였으며, 결함연료 탐지계통의 누설보수에 의한 것으로 예상할 수 있다(한국원자력안전기술원 2004b).

Fig. 3의 K20 원전에서 2018년도에 삼중수소가 전년도 대비 2배 증가한 48 TBq·y^{-1}의 배출량을 보였다. 2018년도에 계획예방정비 중 가압기 배수밸브의 오조작으로 의해 원자로 냉각재가 누설된 사건을 확인하였다(한국원자력안전기술원 2018). 즉, 삼중수소의 배출량 증가에는 냉각재에 의한 영향이 큰 것으로 예상할 수 있다. 한편, Fig. 3의 2008년도 이전에 PHWR의 경우 다른 PWR에 비해 최대 100배 정도 삼중수소 배출량이 높다.

삼중수소 배출량 차이의 가장 주요한 원인은 PHWR의 냉각재 및 감속재로 사용하는 중수에 의한 것으로 판단할 수 있다(Son *et al*. 2013; Kang and Cheong 2021). 삼중수소 배출량 저감을 위해 한국의 PHWR에서는 2007년 삼중수소제거설비(TRF; Tritium Removal Facility)를 설치하였고, 그 이후 기체 삼중수소의 배출량은 설치 이전과 비교하여 K19 원전은 0.4배, K20 원전은 0.98배, K21 원전은 0.91배 감소하는 것을 확인하였다(Song *et al*. 2005; 정 등 2015; Kang and Cheong 2021).

1.2. 액체 방사성유출물 배출특성

Fig. 4의 액체 핵분열 및 방사화생성물(F)는 2003년 K10, K11 원전에서 배출량이 급증하였으며, 배출량이 최대 6배 증가하였다. K10 원전과 K11 원전에서 오염된 소량의 탈염수가 당시 종합폐수처리시설 또는 오수처리시설을 통해 계획 및 관리되지 않은 상태로 환경에 방출된 사건이 있었으며, 핵분열 및 방사화생성물과 삼중수소가 액체상 방사성유출물에 포함되어 배출된 것으로 확인하였다(한국원자력안전기술원 2004a). ^{57}Co, ^{60}Co, ^{56}Mn 등의 핵종이 사건 전년도인 2002년 검출되지 않았지만 사건이 발생한 2003년과 그 다음 해인 2004년의 배출량이 급격히 증가하였다. 2002년 K14 원전에서 전년도 대비 핵분열 및 방사화생성물의 배출량이 14배 증가하였으며, 당시 핵연료 손상에 의해 ^{58}Co이 주기말 운전에서 계통수로 용출되어 감시기에 영향을 준 것으로 확인할 수 있었다(한국원자력안전기술원 2003).

액체 삼중수소(H)의 배출량은 PWR에서 최대값은 23.1 TBq·y^{-1}, 최소값 0.26 TBq·y^{-1}으로 다른 핵종(군)들에 비해 편차가 작은 것을 확인할 수 있다. PHWR은 TRF 설치 이

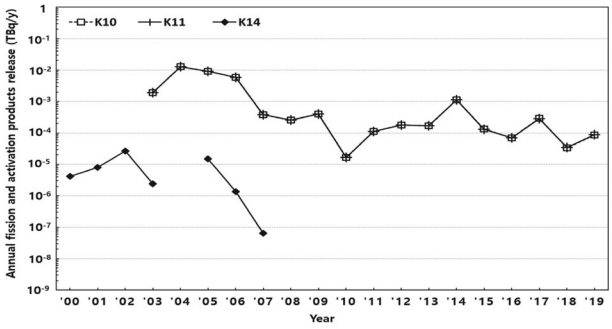

Fig. 4. Annual liquid fission and activation products release from operating NPPs in Korea.

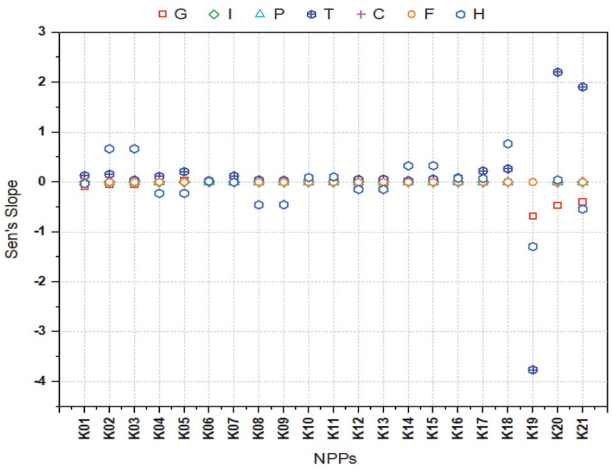

Fig. 5. Sen's slope estimator for each radionuclide group of Korean NPPs.

후에 이전과 비교하여 액체 삼중수소의 평균 배출량은 K19 원전에서 0.36배, K21 원전에서 0.77배 감소하였다. 액체 및 기체 삼중수소의 배출량은 TRF 설치 전에 비해 설치 후 전체적으로 1.8배 감소하였다.

2. Sen's slope을 통한 한국 원전의 방사성유출물 배출추이 분석

한국 원전의 방사성유출물 배출특성을 정성적 분석방법을 통해 확인하였다. 과거 20년 동안 한국 원전의 방사성유출물의 배출특성에 대해 정량적으로 분석 하기 위해 Sen의 기울기 값을 바탕으로 국내 운영 중인 PWR 18기와 PHWR 3기에 대해서 방사성유출물의 연간 배출추이를 분석하였다. 수식 (2)의 Y_{med}값은 경향성을 판단할 수 있는 값으로, 원전별 방사성유출물의 연간 배출량에 대한 Sen의 기울기 값을 Fig. 5에 나타내었다.

한국의 운영 중인 PWR, PHWR의 모든 핵종(군)은 Sen의 기울기가 양의 값으로 증가경향성인 것은 37%를 차지하고, 0의 값으로 그 경향성을 판단할 수 없는 것은 29%, 음의 값으로 감소경향성을 보이는 것은 34%를 차지하였다.

PHWR은 G, P 모두에서 Sen의 기울기가 음의 값이고, PWR은 G에서 18기 중 4기 원전을 제외한 원전에서 음의 값이다. PWR, PHWR 모두에서, I와 P의 핵종(군)에서는 경향성 판단이 불가능한 원전(I는 16기, P는 11기)을 제외한 모든 원전에서 음의 값이며 감소경향성을 보였다. 핵종(군) G, I, P는 운영 중인 원전에서 핵연료 내의 핵분열과 연관되고, 감소경향성을 보이는 것은 핵연료 건전성 개선 효과와 폐기물처리계통의 기술의 향상으로 예상할 수 있다(Harris 2011; NRC 2020; Kang and Cheong 2021).

PWR은 액체 및 기체 삼중수소가 다른 핵종(군)과 비교하여 증가경향성 비율이 높다. 기체 삼중수소는 모든 원전에서 증가경향성을 보이며 액체 삼중수소의 경우 50%가 증가경향성을 보인다. 삼중수소는 정상운영 중에 계통 내에 존재하는 냉각재에서 붕소(Boron)와 리튬(Lithium)의 방사화로 발생되며, 붕소는 1차 냉각재에서 중성자 흡수체로 사용되어 중성자반응으로 삼중수소가 생성되고 원전이 가동됨에 따라 삼중수소는 증가할 것으로 예상할 수 있다(NRC 2020; Kang and Cheong 2021). 또한, 붕산수회수계통(BRS; Boron Recycle System)에 의해 붕소의 일부는 제거되지만 잔여 붕소는 재사용됨으로써 붕소의 농도가 증가하고, 삼중수소의 농도도 증가할 것으로 예상할 수 있다(NRC 2020; Kang and Cheong 2021).

PWR은 삼중수소를 제외한 핵종(군)에 대해서는 Sen의 기울기 값은 0 또는 그에 가까운 값으로 그 경향성을 판단할 수 없는 것을 확인하였다. PHWR에서 기체 삼중수소는 K19 원전을 제외하고는 모두 증가경향성을 보였으며, PHWR에서 Sen의 기울기 크기가 다른 PWR에서보다 평균 25배 정도 크며, 증가경향성의 정도가 큰 것으로 확인할 수 있다. 반면, PHWR에서 기체 핵분열생성물과 입자는 모두 감소경향성을 보이는 것을 확인할 수 있으며, 액체 삼중수소는 감소경향성을 보이는 것을 확인할 수 있다.

전체 핵종(군) 중 액체 삼중수소의 경우 전체 21기 원전 중 10기에서 감소경향성을 보였다. 그 중 PHWR은 Sen의 기울기 크기가 평균 0.63으로 PWR에 비해서 1.7배 이상의 값으로 감소경향성이 더 큰 것을 확인할 수 있다. PHWR에서 액체 삼중수소 배출량의 감소경향성이 우세한 것은 2007년도에 TRF를 설치하면서 삼중수소의 배출량이 저감된 것으로 예상할 수 있다(Song *et al*. 2005; 정 등 2015; Kang and Cheong 2021).

C의 배출량은 PWR, PHWR에서 96%의 증가경향성을 보인다. C는 감속재, 열전달냉각계통, 핵연료에서 생성되며 극히 일부만 연료에 남아있고, 나머지는 감속재 및 1차 열전달 정화계통의 이온교환수지에 의해 제거된다. 하지만, 수지의 상당량은 원자로 수명이 끝날 때까지 축적되므로

배출량은 증가할 것으로 추정할 수 있다(IAEA 2004; Kang and Cheong 2021).

3. 방사성폐기물 처리계통의 종류에 따른 방사성유출물 배출특성

국내의 모든 원전에서 액체 및 기체 방사성유출물의 배출을 저감시키고자 처리계통을 설치하여 운영하고 있다(KHNP 2008). 액체 방사성유출물의 주요 처리계통 및 방법으로 이온교환기(Ion Exchanger), 탈염기(Demineralizer), 역삼투압(Reverse Osmosis), 폐액증발기(Evaporator) 등이 있으며, 기체 방사성유출물 주요 처리계통은 활성탄지연대(Delay Bed), 감쇠탱크(Decay Tank)가 있다(Son *et al*. 2013). 액체폐기물 처리 계통 중 이온교환기, 탈염기, 역삼투압의 방법을 활용하는 원전들의 액체 방사성유출물의 배출량을 비교하였을 때, 설치유무에 따른 핵종(군)별 배출량의 차이를 보이지 않았다. 반면에, Fig. 6의 폐액증발기가 설치되어 있는 원전에서 액체 핵분열 및 방사화생성물의 배출량은 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있다. 기체유출물의 주요 처리계통인 활성탄지연대와 감쇠탱크의 운영 유무에 따른 기체유출물 배출량은 모든 핵종(군)에서 일정한 차이를 확인할 수 없었다.

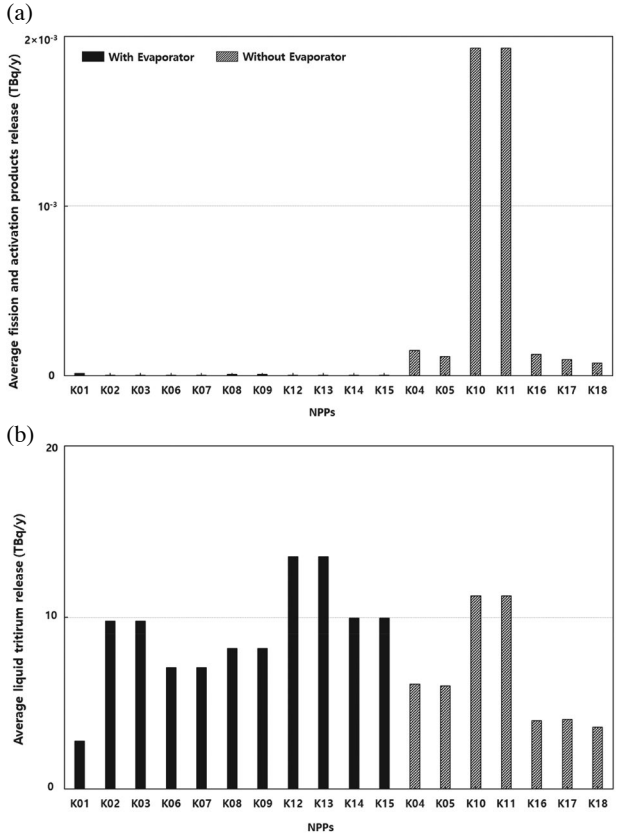

Fig. 6. Average release of liquid radioactive effluent (TBq · y^{-1}) with or without evaporator in NPPs. (a) and (b) indicate liquid fission and activation products release and liquid tritium release, respectively.

Fig. 6의 핵분열 및 방사화생성물은 폐액증발기 설치 원전이 미설치 원전에 비해 평균 약 170배 적게 배출되었으며, 이는 폐액증발기 설치가 방사성물질의 배출량 감소에 효과가 있다는 것을 예상할 수 있다. 그러나 액체 삼중수소는 폐액증발기 설치여부에 의미있는 상관관계가 확인되지 않았다.

결 론

이 연구에서는 원자력발전소의 방사성유출물 환경배출량 데이터 조사 및 분석을 위해 국내 21기 원전에 대해 2000년도에서 2019년까지의 가용한 데이터를 수집하였다. 국내 원전의 액체 및 기체 방사성유출물 배출특성을 Sen의 기울기 검정을 활용하여 정량적으로 경향성을 분석하였다. 그 결과로 기체 핵분열생성물, 방사성아이오딘, 기체 입자는 핵연료 건전성 개선 효과로 인한 감소경향성을 추정할 수 있으며, 액체 및 기체 삼중수소 감소경향은 중수로 삼중수소제거설비 운영효과로 판단할 수 있었다. 또한, 액체 핵분열 및 방사화 생성물의 감소경향은 운영자의 저감 노력 및 처리계통 성능개선 효과로 판단할 수 있었다.

방사성유출물 배출량과 원전의 주요 운전이력 및 사건과의 연계성에 대한 정성적 분석을 통해 핵분열생성물은 원전의 원자로 내의 핵연료 결함에 의해 배출량이 증가하는 것으로 확인할 수 있으며, 액체 및 기체 삼중수소는 PHWR에서 삼중수소제거설비의 시행으로 인한 저감효과로 배출량이 감소하는 것을 분석할 수 있었다. 그리고, 모든 원전에서 운영되고 있는 액체 및 기체 방사성폐기물 처리계통 중 액체폐기물의 처리계통인 폐액증발기를 설치한 원전은 액체 핵분열 및 방사화생성물의 배출량이 미설치 원전에 비해 상대적으로 적은 것을 확인하였다.

이 연구는 국내 원전의 액체 및 기체 방사성유출물 배출량의 연도별·호기별 변화추이와 배출량에 영향을 주는 인자를 분석하였고, 향후 국내 원전의 액체 및 기체 유출물 관리 개선방향을 도출할 수 있을 것이다. 또한, 국내 방사성유출물 과거 배출량 데이터를 수집하여 운전이력 및 사건에 따른 액체 및 기체유출물의 핵종(군)별 배출량의 상관관계를 분석함으로써 원전의 사건징후 인지 및 운전이력 사후 확인 기술로 확장할 수 있을 것이다.

사 사

본 연구는 원자력안전위원회의 재원으로 한국원자력안전

재단의 지원을 받아 수행한 원자력안전연구사업의 연구결과입니다(No.2003017).

참 고 문 헌

원자력안전위원회. 2021. 원자력안전법 시행규칙 총리령 제1708호.

정진욱, 김상왕, 정현걸, 임 준, 정성일, 김종욱. 2015. 중수로 원전 주변 환경 중의 삼중수소방사능 농도 비교. 한국방사성폐기물학회 추계학술대회 October 14-16. pp.505-506.

한국원자력안전기술원. 2001a. 고리 2호기 계획 예방정비 기간 중 핵연료 손상 확인.

한국원자력안전기술원. 2001b. 월성 2호기 정화계통 누설로 인한 수동정지.

한국원자력안전기술원. 2002. 월성 2호기 냉각재정화계통 중간정비를 위한 원자로 수동정지.

한국원자력안전기술원. 2003. 울진 3호기 방사선 백색비상 발령.

한국원자력안전기술원. 2004a. 영광 5호기 탈염수 공급모관 오염 및 방사성물질 환경방출.

한국원자력안전기술원. 2004b. 월성 2호기 결함연료탐지계통 누설보수를 위한 원자로 수동정지.

한국원자력안전기술원. 2018. 월성 3호기 계획예방정비 중 가압기 배수밸브 오조작에 의한 원자로냉각재 누설 등급평가 결과(안).

Harris JT. 2011. Radiological Releases and Environmental Monitoring at Commercial Nuclear Power Plants. pp. 237-260. In: Nuclear Power Operation, Safety and Environment (T. Pavel eds.), InTech, London, UK.

IAEA. 2004. Management of Waste Containing Tritium and Carbon-14, Technical Reports Series No. 421. International Atomic Energy Agency. Vienna. Austria.

Jeon HT, Hamm SY, Cheong JY, Lee CW, Lee JT and Lim WR. 2018. Analysis of long-term water level change of Dongrae hot spring using time series methods. *J. Geol. Soc. Korea* **54**(5):529-544.

Jin DH, Jang SH, Kim HK and Lee YS. 2021. A trend analysis of seasonal average temperatures over 40 years in South Korea using Mann-Kendall test and sen's slope. *KJAS* **34**(3):439-447.

Kang JS and Cheong JH. 2020. Characteristics of Radioactive Effluent Releases from Pressurized Water Reactors After Permanent Shutdown. *Energies* **13**(10): 2436.

Kang JS and Cheong JH. 2021. New methodologies to derive discharge limits considering operational flexibility of radioactive effluents from Korean nuclear power plants based on historical discharge data. *Nucl. Eng. Technol.* in press.

KHNP. 2008. Final Safety Analysis Report of Kori Unit 2. Korea Hydro and Nuclear Power Co. Ltd. Gyeongju.

KHNP. 2009. Radiation management yearbook. Korea Hydro and Nuclear Power Co. Ltd. Gyeongju.

KHNP. 2019. Survey of radiation environment and assessment of radiological impact on environment in vicinity of nuclear power facilities. Korea Hydro and Nuclear Power Co. Ltd. Gyeongju.

Kong TY, Kim S, Lee Y, Son JK and Maeng SJ. 2017. Radioactive Effluent Release from Korean Nuclear Power Plants and the Resulting Radiation Doses to Members of the Pubic. *Nucl. Eng. Technol.* **49**(8):1772-1777.

Kwak S, Bhattrai BD, Choi K and Heo W. 2015. Long-term Variations of Water Quality Parameters in Lake Kyoungpo. *Korean J. Ecol. Environ.* **48**(2):95-107.

NRC. 2020. Calculation of Releases of Radioactive Materials in Gaseous and Liquid Effluents from Pressurized Water Reactors, NUREG-0017, Revision 2. United States Nuclear Regulatory Commission. Washington. DC. USA.

OECD/NEA. 2003. Effluent Release Options from Nuclear Installations. ISBN 92-64-02146-9. Organisation for Economic Co-operation and Development/Nuclear Energy Agency. MA. USA.

OSPAR. 2018. Liquid Discharges from Nuclear Installations in 2016. Oslo and Paris Commissions. London. UK.

Sen PK. 1968. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *J. Am. Stat. Assoc.* **63**:1379-1389.

Son JK, Kim HG, Kong TY, Ko JH and Lee GJ. 2013. Radiological Effluents released and public doses from nuclear power plants in Korea. *Radiat. Prot. Dosim.* **155**(4): 517-521.

Song KM, Sohn SH, Kang DW and Chung HS. 2005. Introduction to Wolsong Tritium Removal Facility (WTRF), in Transaction of the Korean Nuclear Society Autumn Meeting October 27-28. Busan. Korea.

Received: 30 November 2021
Revised: 21 December 2021
Revision accepted: 21 December 2021